

## **A EXATIDÃO DA MEDIÇÃO DE TEMPERATURA EM PROCESSOS CIENTÍFICOS E INDUSTRIAIS**

### **Denise das Mercês Camarano**

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO  
Rua Tupis 343, sala 711, CEP 30 190-060, Centro , Belo Horizonte – MG, Telefax: (31) 3213 4328 ou (31) 3213 3293  
[dmcamarano@inmetro.gov.br](mailto:dmcamarano@inmetro.gov.br)

### **Roberto Márcio de Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG  
Av. Antônio Carlos, 6.627 - CEP 31.270-901, Campus Pampulha, Belo Horizonte - MG, Fone (31) 3499 5244  
[roberto@demec.ufmg.br](mailto:roberto@demec.ufmg.br)

**Resumo.** *Temperatura é uma grandeza especial da metrologia. Alta exatidão e baixa incerteza de medição são cada vez mais exigidas. Segurança, economia e a exigência internacional de qualidade assegurada e rastreabilidade significam que mais empresas/institutos de pesquisas estão preocupadas com o processo de medição. O presente trabalho se propõe a oferecer suficiente informação para a melhoria da qualidade metrológica das medições tanto em processos industriais como em processos científicos, servindo como um guia para atingir os resultados desejados. Primeiramente, é abordada a problemática envolvida na metrologia em geral e especificadamente na metrologia térmica. Em seguida são apresentadas de forma prática, as diversas fontes de incerteza envolvidas na medição de temperatura.*

**Palavras chave:** *Temperatura, qualidade metrológica, exatidão.*

### **1. Introdução**

No cenário mundial, a metrologia passa por um momento de grandes transformações. O fenômeno de globalização do comércio despertou novos interesses e a metrologia, até então circunscrita a interesses internos específicos dos países, passa a constituir elemento da estratégia da competitividade de empresas e nações. Num amplo contexto, passa a ser reconhecida como elemento indissociável dos vigorosos processos de inovação tecnológica, de conquista e de globalização de mercado. A metrologia ganha reconhecimento como ferramenta capaz de remover as barreiras técnicas não-tarifárias que limitam o comércio e, definitivamente, é reconhecida como a ciência da competitividade.

Neste sentido, devido às rápidas transformações tecnológicas, onde as inovações de processos e tecnologias mudam exponencialmente, todos os segmentos precisam modernizar-se, melhorar a qualidade dos seus produtos, diminuir tolerâncias de fabricação e reduzir custos. Aí tem destaque o problema da metrologia temperatura, frente à grande incidência prática de tal situação e a elevada importância da temperatura como parâmetro principal de interferência na maioria dos processos. Assim, quanto mais exata for a medição da temperatura maior será seu efeito na competitividade corrente e futura da indústria no contexto da melhoria ou da manutenção da qualidade de produtos e serviços. Além disso, o desenvolvimento de medições bem estabelecidas compreende etapas como planejamento consistente, análise teórica, metodologia adequada, procedimento bem elaborado, levantamento das fontes de erro, controle do meio ambiente, cálculo de incerteza e aplicação da metodologia com regularidade.

Este trabalho aborda de forma genérica alguns aspectos da problemática envolvida na medição de temperatura. Primeiramente, é feita uma análise prática do ponto de vista da importância e do quadro geral encontrado no Brasil. Em seguida, são apresentadas algumas recomendações referentes a seleção do transdutor/sensor de temperatura, considerado como primeira etapa de qualquer processo de medição de temperatura. É também apresentada de forma sistematizada as principais fontes de erros na medição automatizada de temperatura com transdutores do tipo termopar e sensores resistivos.

### **2. A importância da metrologia térmica**

Nos diversos segmentos de mercado, sejam estes químico, petroquímico, eletro-eletrônico, siderúrgico, cerâmico, farmacêutico, vidreiro, alimentício, papel e celulose, hidrelétrico, nuclear e em muitos outros processos de interesse científico, a monitoração da variável Temperatura é fundamental para a obtenção do produto final especificado. A temperatura afeta todos os processos produtivos, pode-se dizer, que a temperatura é a grandeza física mais medida e controlada em todo o mundo. De todos os tipos de transdutores utilizados, da ordem de 15 % são transdutores de temperatura. Camarano (1993) mostra que temperatura é um parâmetro fundamental na maioria dos processos físicos, sendo que em torno de 60 % dos parâmetros controlados estão associados com ela. Destes 15 %, 70 % a 80 % são termopares e sensores resistivos. NIST (1999) mostra que no mercado interno americano a venda anual de termopares e seus acessórios foi estimada em aproximadamente US\$ 280 milhões e seu efeito na estrutura produtiva da ordem de US\$ 81 bilhões, de acordo com o relatório sobre o impacto econômico do programa de calibração de termopares do Instituto Nacional de Metrologia dos Estados Unidos. Borin et al (2000) mostram que na produção de leite, o Brasil no

ano de 1999 teve uma produção de 20 bilhões de litros, o que reflete um gasto de divisas da ordem de US\$ 500 milhões e o principal fator que afeta de forma considerável a produção é o efeito do estresse térmico no desempenho reprodutivo das vacas de leite.

Tavener (1999) cita como outro exemplo da importância da medição de temperatura a esterilização de alimentos, remédios e equipamentos hospitalares nos quais devem ser submetidos à 121°C. Devido a uma não adequada calibração de seus sensores/transdutores de temperatura, um fabricante internacional de remédios teve que retirar do mercado 1 milhão de libras em medicamentos. Atualmente, essa empresa calibra seus sensores/transdutores em pontos fixos. Em uma unidade geradora de energia termoeletrica, um aumento de 1 °C na exatidão das medições na planta economiza em aproximadamente US\$ 100 000 por ano em combustível para alimentação dos geradores. Na indústria têxtil, cada fio é feito de até 200 fibras se apenas uma dessas fibras estiver na temperatura incorreta, a tinta usada para colorir o fio não será absorvida uniformemente e todo o lote será rejeitado, sendo necessário a calibração de cada sensor/transdutor de temperatura antes do uso. Na fabricação de filmes coloridos, geralmente, os filmes produzidos em temperaturas diferentes possuem tonalidades diferentes. Um empresa internacional usa uma célula do ponto de fusão do gálio em cada uma de suas fábricas no mundo para assegurar a cor de seus filmes. Cita-se, também, as câmaras frias e cargas refrigeradas onde centenas de sensores/transdutores de temperaturas são usadas para assegurar que todos itens estejam abaixo de 0 °C .

### 2.1. A metrologia térmica no Brasil

A estrutura metrológica brasileira se desenvolveu rapidamente, tanto em nível de laboratórios primários como industriais, devido a demanda criada pelas empresas que buscaram a certificação de seus sistemas da qualidade. Theisen (2000) mostra que o conhecimento metrológico em geral tanto nas indústrias como nas instituições de ensino não evoluíram tão rapidamente. Haja vista problemas de interpretação da necessidade de calibração de alguns equipamentos, rastreabilidade ou da necessidade de se utilizar laboratórios credenciados. Além disso, a medição de temperatura no passado era de pouco interesse ou era considerada menos importante quando comparada com as medições de grandezas elétricas, tais como tensão e resistência, entre outras

Melo et al (2000) mostra uma recente pesquisa com 271 empresas do Estado do Paraná indicando que os serviços de calibração térmica apresentam 11 % de grau de importância e 6 % de grau de utilização, isto é, mesmo sendo de importância elevada os serviços de calibração na área de metrologia térmica deixam de ser utilizados. Infelizmente, as calibrações são vistas apenas como um custo necessário para a manter a certificação, i.e., simplesmente para possuir um certificado de calibração que seria mantido e só retirado de lá quando solicitado pelo auditor. Geralmente, a implementação de procedimentos de garantia da qualidade metrológica e sua correta aplicação cria problemas, pois consomem tempo e dinheiro. Outro aspecto relevante trata-se da escolha inadequada do laboratório que executará o serviço de calibração que é considerado muitas vezes apenas pelo preço e do pessoal envolvido na medição que muitas vezes tem pouca ou nenhuma qualificação.

Stempniak (2000) mostra que nas instituições de ensino/pesquisa, muitas vezes a desatualização com os aspectos novos da metrologia em geral transparece nos textos utilizados pelos alunos, bem como na linguagem oral dos professores/pesquisadores. No que se refere aos conceitos, entendimento e avaliação da incerteza de medição o problema é ainda maior, concentrando-se na maioria das vezes no desvio padrão amostral. As teses de doutorado e mestrado em se tratando do aspecto metrológico deixam a desejar e mostram que este conhecimento é trabalhado de modo insuficiente.

### 3. Seleção dos sensores/transdutores de temperatura

Para que um processo de medição de temperatura seja adequado para uma dada tarefa de medição é necessário considerar alguns fatores. O primeiro deles é o conhecimento da grandeza temperatura e da problemática envolvida (requisitos metrológicos e operacionais da aplicação). Em seguida, é necessário selecionar o sistema de medição cuja qualidade metrológica esteja assegurada. Na prática na maioria das vezes a seleção de sistemas de medição de temperatura é feita considerando somente as incertezas individuais dos instrumentos. Entretanto, há uma grande variedade de circunstâncias nas quais se deseja medir a temperatura que apresentam particularidades inerentes que devem ser levados em consideração. Contudo, mesmo devido a esta diversidade de situações recomenda-se o conhecimento de alguns fatores:

- faixa de medição - é necessário determinar qual é faixa de medição, qual o sensor/transdutor de temperatura que atende tal faixa, pessoal envolvido e o custo efetivo;
- resolução - esta deve ser compatível com os resultados esperados;
- comportamento dinâmico do mensurando (estabelece o tempo de resposta mínimo necessário ao sistema);
- exatidão, linearidade, estabilidade, sensibilidade e reaproveitabilidade. O não reaproveitamento é fator determinante em aplicações como por exemplo em ensaio de refrigeradores, onde há a necessidade de facilidade de fixação e de que em muitos pontos de medição, sejam os transdutores descartados após a aplicação;
- incerteza de medição/tolerância do mensurando - a análise da incerteza consome tempo e é necessário muito conhecimento. É relação entre incerteza e tolerância que define o intervalo de aceitação dos resultados. Quanto mais estreita for a tolerância mais crítico é o processo de seleção do sistema de medição;

- calibração/intervalo de calibração - a calibração pode consumir uma significativa quantidade de tempo e exigir laboratórios bem equipados e pessoal qualificado. Muitos fabricantes possuem laboratórios de calibração interno e outros utilizam serviços de terceiros. O intervalo de calibração quando não bem definido implicará em um aumento significativo de custo.
- natureza do meio imediatamente ao redor do meio sob medição (por exemplo: fluidos corrosivos, fluidos eletricamente condutores, alta pressão, temperatura elevada e fatores similares, podem impor restrições ao transdutor selecionado);
- condições ambientais adicionais temperatura ambiente (ex.: vibrações, umidade, campos elétricos e magnéticos);
- instalação (usinabilidade, fragilidade, condutividade elétrica, soldabilidade e condutividade térmica que são propriedades do material utilizado para proteger o transdutor e devem ser consideradas pois podem afetar a durabilidade da instalação e a qualidade dos resultados);
- simplicidade (se refere a facilidade para encontrar soluções, considerando tempo, custo, conhecimentos e cálculos matemáticos requeridos. Este critério é muito importante pois as empresas normalmente buscam soluções simples de seus problemas).

#### 4. Principais fontes de erros na termometria de transdutores elétricos de temperatura

A qualidade do resultado de uma medição é avaliada pela sua incerteza. Os erros envolvidos dependem dos inúmeros elementos que compõem o processo de medição, o qual é caracterizado pelos instrumentos, procedimentos de medição e condições de contorno particulares. Expressar um resultado confiável implica levar em consideração o processo de medição como um todo, sob pena de se chegar a resultados totalmente enganosos.

Com a crescente tendência à padronização entre fabricantes de módulos de sistemas de aquisição de sinais vai se tornando cada vez mais interessante e economicamente, a opção por um sistema genérico encadeado a partir de produtos modulares de diferentes fabricantes, fazendo com que a incerteza do processo de medição deva ser calculada a partir das características específicas de cada módulo, como é apresentado na Figura (1). Observa-se que poucos são os fabricantes de instrumentos que fornecem especificações necessárias para a composição das incertezas na medição de temperatura automatizada.

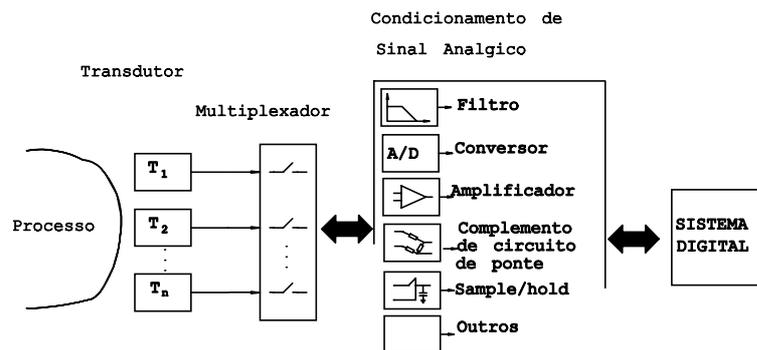


Figura 1. Diagrama esquemático de um sistema generalizado de medição.

Considerando os erros e as incertezas associadas aos sistemas elétricos na medição automatizada de temperatura, para efeito de análise, as principais fontes de erros podem ser divididas em dois grupos: comuns aos sistemas de medição elétricos e específicas da automação, como é mostrado na Tab. (1).

Tabela 1. Principais fontes de erros associadas aos sistemas de medição automatizada de temperatura

Fontes de erro	Tipo
Comuns aos sistemas elétricos de medição	Instabilidades da característica de resposta
	Retroação nas interligações de instrumentos
	Forças eletromotrizes térmicas parasitas
	Offsets e drifts
	Ruídos
	Tensões de modo comum
Específicas da automação	Multiplexação
	Conversão analógico/digital (A/D)

A instabilidade da característica de resposta é função do tempo ou mesmo de outras grandezas de influência, tal como temperatura e umidade, podendo ser de caráter permanente, de curta ou de média duração. Este é um dos

principais fatores que afetam a incerteza de medição e a sua influência é função do tipo de sistema de medição. A retroação (relação de impedâncias) nas interligações dos instrumentos, pode torna-se crítica, principalmente para circuitos fontes com alta resistência. Uma das maneiras de analisar este efeito é aplicação do teorema de Thévenin, Camarano (1993). Forças eletromotriz térmica aparece nos pontos de contato de metais dissimilares submetidos a gradientes de temperatura. Tais pontos de contatos existem em junções de condutores, chaves com relés, ou terminais de entrada dos instrumentos. Tensões e correntes de offsets são fontes de interferências desenvolvidas nos terminais de entrada dos instrumentos, e mais significativamente nos amplificadores. A maioria dos parâmetros elétricos mostram um comportamento dependente da temperatura, tempo e tensão de alimentação; e são caracterizados como drifts. A influência da temperatura nos parâmetros é geralmente especificada pelos fabricantes em termos de coeficiente de temperatura. O ruído Johnson (térmico), dentre os tipos de ruídos mais comuns a componentes eletrônicos, é o mais importante, pois está presente em todos os elementos contendo resistência (Camarano, 1993). A taxa de aquisição de sinais não deve ser extremamente alta na termometria automatizada sob pena de aumento desnecessário do erro devido ao ruído Johnson. A tensão de modo comum aparece, em geral, em função da alimentação de transdutores passivos e do acoplamento capacitivo da rede de 60 Hz com o circuito de medição. Guarding e blindagem ativa são as técnicas mais eficientes empregadas pelos fabricantes de instrumentos para, em conjunto com a alta razão de rejeição de modo comum, minimizar tal efeito. Interferências de campos elétricos e magnéticos irão provocar o aparecimento de sinais indesejáveis no circuito de medição, em especial na transmissão do sinal do transdutor. Em geral, o nível de interferência dependerá da proximidade das fontes de interferências, amplitude do sinal e configuração do circuito de medição.

Basicamente, as fontes de erros específicas da automação são decorrentes da multiplexação e da conversão A/D. A multiplexação de transdutores é procedimento freqüente na aquisição automatizada de sinais de medição, pois o circuito é mais simples e barato do que se cada transdutor tivesse sua própria unidade de tratamento de sinal. A análise dos erros inerentes ao circuito de multiplexação é feita com base em modelos matemáticos estabelecidos a partir dos modelos elétricos equivalentes. Em termos de composição da incerteza de medição a conversão A/D não é crítica, haja vista que as freqüências envolvidas na termometria são baixas. Preocupação maior fica por conta das impedância de entrada do módulo de conversão.

Muitos dos erros são específicos do transdutor e situações particulares, e podem ser identificados como fontes de erros primários. Por exemplo, para termopares tem-se os erros devido a não homogeneidades presentes nos fios e aquelas devidas a junção de referência. Para os sensores resistivos, como exemplo tem-se os erros devido ao auto aquecimento e a não-linearidade. Como fontes erros comuns aos transdutores elétricos, tem-se os relacionadas a condução de calor, a resistência da isolamento, histerese, corrosão em alta temperatura, dentre outros.

A análise dos problemas na medição de temperatura relacionados com a aplicação é imprescindível, principalmente aqueles que se referem a estabilidade, uniformidade da temperatura e o meio sob medição. Como verifica-se na medição de temperatura em escoamento de fluidos e de superfície (Figliola & Beasley, 1995).

## 6. Considerações finais

Nenhuma medição é perfeita, mas com conhecimento das principais fontes de erros, é possível em um processo de medição de temperatura qualquer, seja na indústria ou nas instituições de pesquisa/ensino, estabelecer um procedimento de medição simplificado de modo a produzir resultados mais confiáveis, considerando as características do processo/projeto, requisitos metrológicos, qualidade e os custos envolvidos. Entretanto, é necessário que as instituições de ensino atualizem a Estrutura Curricular dos cursos procurando atender as constantes mudanças tecnológicas de um mercado cada vez mais inserido nas questões relativas a qualidade, produtividade e competitividade. O profissional do futuro deve ser capaz além de produzir de acordo com o estado da arte mas, também, de acordo com as exigências do mercado internacional, alta exatidão e baixa incerteza de medição. Nas indústrias é inevitável uma efetiva capacitação dos recursos humanos que atuarão nos diferentes níveis da cadeia produtiva e imprescindível a compreensão do processo de medição de temperatura como um todo para permitir demonstrar a qualidade metrológica que requer conhecimento e qualificação.

## 5. Referências

- Borim, A.C.A., Pinto, C.A.R, Fernandes, J.M., et all, 2000, "Medição de Temperatura e Umidade par Controle de Ambiência na Produção Leiteira", Proceedings of the II Brazilian Congress of Metrology", São Paulo, Brazil, pp, 239-245.
- Camarano, D.M.,1993, "Procedimentos Aplicáveis à Garantia da Qualidade Metrológica das Medições Automatizadas de Temperatura com Termopares e Sensores Resistivos" , UFSC, Florianópolis, Brasil.
- Figliola, R. S.; Beasley, D. E., 1995, Theory and Design for Mechanical Measurements, John Wiley & Sons, Inc., 2<sup>nd</sup> ed., New York, USA.
- Melo, C.F., Viel, R., Arruda, L.L., et all, "Pesquisa da Demanda por serviços Tecnológicos", Proceedings of the II Brazilian Congress of Metrology, São Paulo, Brazil pp.223-229.
- National Institute of Standards and Technology - NIST, 1997, "Economic Assessment of the NIST Thermocouple Calibration Program, 97-1 Planning Report, Washington, USA.

- Stempniak, R.A., 2000, "Princípios da Metrologia como Parte do Ensino de Física - Uma Proposta", Proceedings of the II Brazilian Congress of Metrology, São Paulo, Brazil pp.208 -213.
- Tavener, J., 1999, "Conceitos Básicos de Calibração de Sensores de Temperatura" Seminários Internacional de Medição de Temperatura, São Paulo, Brasil.
- Theisen, A.M.F., 2000, "A Contribuição da Calibração dos Equipamentos de Medição para a Qualidade do Produto", Proceedings of the II Brazilian Congress of Metrology, São Paulo, Brazil pp.412-415.

## ACCURACY IN THE MEASUREMENT TEMPERATURE IN THE CIENTIFIC AND INDUSTRIAL PROCESSES

### **Denise das Mercês Camarano**

Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – INMETRO  
Rua Tupis 343, sala 711, CEP 30 190-060, Centro , Belo Horizonte – MG, Telefax: (31) 3213 4328 ou (31) 3213 3293  
[dmcamarano@inmetro.gov.br](mailto:dmcamarano@inmetro.gov.br)

### **Roberto Márcio de Andrade**

Departamento de Engenharia Mecânica da UFMG  
Av. Antônio Carlos, 6.627 - CEP 31.270-901, Campus Pampulha - Belo Horizonte - MG, Fone (31) 3499 5244  
[roberto@demec.ufmg.br](mailto:roberto@demec.ufmg.br)

**Abstract.** *Temperature is a special quantity of the metrology. High accuracy and small uncertainty of measurement are each more requirement. Security, economy and the international requirement of quality assurance and traceability means industry/research center are worried the measurement process. In this present paper are offered information enough to imporve the quality metrological of the measurement in the cientific and indusrial processes. It serves as a guide to achieve the required results. Firstly, are discussed the problems in the general metrology and specifically in the thermal metrology. In addition, are shown in an easily understood format, the errors sources in the temperature measurement.*

**Keywords.** *Temperature, metrological quality, accuracy.*